

データ

核融合炉ブランケットデータベース (2) (Li_2TiO_3 及び Li_2ZrO_3 固体増殖材)

二村 嘉明*・河村 弘**

富山大学水素同位体機能研究センター*

〒930 富山市五福3190

日本原子力研究所**

〒91113 茨城県東茨城郡大洗町成田町新堀3067

Data Base for Tritium Breeding Blanket of Fusion Reactor (2) (Li_2TiO_3 and Li_2ZrO_3 Solid Breeding Material)

Yoshiaki FUTAMURA* and Hiroshi KAWAMURA**

Hydrogen Isotope Research Center, Toyama University*

Gofuku 3190, Toyama 930, Japan

Japan Atomic Energy Research Institute**

3607 Shinbori, Narita, Oarai-machi

Higashi-ibaraki-gun, Ibaraki-ken, Japan

(Received September 17, 1996; accepted December 26, 1996)

Abstract

This compilation of data for Li_2TiO_3 and Li_2ZrO_3 ceramic breeding material is a part of a study to construct a database for breeding blanket material for a fusion reactor, consisting of breeding material, neutron multiplier compilation were collected from as many papers and reference books as possible.

Nevertheless, there may be data that were taken from past experiments than those collected in this compilation. So the authors are going to continue collecting data of this type

Data were arranged in a matrix form to clarify the properties of insufficient data so as to be easily used. This database is expected to be very useful and necessary for designing and analyzing breeding blankets.

1. はじめに

核融合炉ブランケットを設計する場合には、まず第一に、ブランケットを構成するトリチウム増殖材、中性子増倍材、構造材、冷却材およびバージガス等として使用される物質それぞれに関する物理的特性、機械的特性、化学的特性、安定性および両立性、トリチウム

ムとの相互作用および照射効果等の諸特製に係るデータが必要欠くべからざるものである。

現在、これらのデータは部分的に収集・整理され、その精度等が明らかになっているものもある。しかし、全般的に観れば、多数の研究者によって種々の値が求められたり、一つしかデータがなかったり、全くデータのないものも見受けられる。このような状況下でブランケット設計には必要なデータベースを作成することは、十分意識のあることである。筆者等は、このデータベース作成の第一歩として、ブランケット固体増殖材 Li_2O に係るデータを収集・整理して発表した。第二報として、 Li_2O の次にブランケット固体増殖材の候補材として有望視されている。 Li_2TiO_3 、 Li_2ZrO_3 に係るデータを収集・整理して発表することにした。

これによって、データのある項目、ない項目が明らかになるとともに、それが何時得られたものであるかも明らかになり、ブランケット設計および特性解析等に強力な助人を提供することになる。

しかし、筆者等だけでは、その調査範囲、調査能力に限界があり、データが存在するにも係らず、見落として収集していないものがある恐れがある。したがって、ブランケットに関心があり、且つ、関係がある方々の協力を得ることにより、データなしとした項目へのデータ提供、データがある項目への新しいデータ提供、データ修正提供およびデータの扱い方等に関する色々な指摘等を筆者等は期待している。このようなデータの提供や色々な指摘等によって、より良い有用なデータベースを作成していくことが出来ると信じている。

2. 固体増殖材 Li_2TiO_3 及び Li_2ZrO_3 のデータ収集・整理方法

データ収集に際しては、収集するデータ項目をブランケット設計および特性解析上の必要性の観点から選定し、その項目のデータが載っている文献類を広く調査した。

文献および関連論文等から、所定項目に該当するデータを探索し、同じ項目のデータに差異がある場合でもそのまま記載することにし、その値の評価はデータがほぼ出揃った時点で実施することにしていく。収集したデータは原則として、新しい年代の文献より得られたものから記載することにした。

3. データ項目

3.1. データ項目の選定

固体増殖材の機能は、①中性子トリチウム反応によるトリチウムの生成とパージガスへのトリチウムの放出、②熱エネルギーの発生、および発生エネルギーの冷却材への伝導、③中性子の遮蔽である。これらの機能に直接関与するものの他に、増殖材の化学的安定性および両立性、ならびに照射効果等も重要な要素である。このような機能を有するブランケットの設計、特性解析に必要な項目としてTable3.1に示すようなデータ項目を選定した。

Table3.1 Date List Ceramic Breeder Material

<u>Physical properties</u>	•Thermal shock resistance	•Solubility
•Crystalline structure		•Desorption
•Molecular weight	<u>Chemical stability and</u>	
•Density	<u>compatibility</u>	•Tritium retention
•Melting Point	•Compatibility of Li ₂ O	•Helium retention
•Thermal conductivity	and water	
•Thermal expansion	•Compatibility of Li ₂ O	<u>Radiation effects</u>
•Specific heat	and structure material	•Grain growth
•Heat capacity		•Swelling
•Hardness	<u>Tritium solubility and</u>	
	<u>transport</u>	<u>Miscellaneous properties</u>
<u>Mechanical properties</u>	•Mass transport of Li	•Tritium residency time
•Young's modulus	•Chemical composition of	•Vapor pressure
•Poisson's ratio	released Tritium in breeder	
•Tensile strength	•Tritium diffusion coefficient	
•Compressive strength	factor	
•Bending strength	•Water vapor adsorption	
•Creep rate		

3. 2. データの表示

データベースの簡便な利用および相互の比較が容易にでき、データの使用範囲、データの導出時の条件等が容易に把握できるように、データ導出に係る文献名を挙げるとともに、データをやむをえず、式または表等で示す場合は、可能な限りその式表示をブランケット運転条件内でグラフ表示することにする。グラフ表示できない場合にはデータ相互の比較のため、ブランケット通常運転条件（例えば、600℃）、室温（RT）下での計算値を原則的に表示することにする。なお、Li₂TiO₃やLi₂ZrO₃の特性がLi₂Oを含む固体増殖材の特性をグラフ表示して、相互比較し易いようにする。

4. Li₂TiO₃（セラミック増殖材）データ

データ表の見方を次に示す。

項 目：同項目でデータがいくつもある場合には、(1), (2) ...をつけて値を示す。

(註) の値は、ある条件下で式表示の式を使用して計算した値である。

データ：数値に () のある値は、外挿値または推定値である。

単 位：原則としてC.G.S単位であるが、使用した単位を示す。

式：環境条件の影響を受けるものを式で示す。

条 件：式表示の成立条件または式を使用して、数値計算した場合の条件を示す。

グラフ (Fig)：データをグラフまたは式の値でグラフに示す。

参 考 文 献：データ収集に関係した文献を示す。

4.1 物理的特性 (Physical properties of Li_2TiO_3)

項目	データ数	データ	単位	式	条件 (又は備考)	グラフ(Fig.)	参考文献
4.1.1	1	立方晶系(α, γ) 単斜晶系(β)					1)
結晶構造	2	単斜晶系			1050°Cで焼結して作成したものの 0.95 (単斜晶系) + 0.05(立方晶系)		2)
4.1.2							
分子量							
4.1.3	1	2.0(α), 3.43(β) 2.57(γ)	g/cm^3				1)
密度	2	3.43(β)			Li / Ti = 2.0, 100 %TD		2)
4.1.4	1	1535	$^{\circ}\text{C}$				1)
融点	2	1535			Li / Ti = 2.0, 100 %TD		2)
4.1.5	1	2.0			1000K, 85 %TD		1)
熱伝導度	2	1.955	$\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$		Li / Ti = 1.9, 80 %TD		2)
	3	式示		$3.258 (1-2 \epsilon)$	単斜晶系, $\epsilon = \text{porosity} (0.1 \sim 0.3)$		2)
4.1.6	1	16×10^{-6}					1)
熱膨張	2	21×10^{-6}	$1/\text{K}$		Li / Ti = 1.9, 80 %TD (線膨張)		2)
	3			$5.505 \times 10^{-7} T^2 - 4.756 \times 10^{-3} T + 3.827 \times 10^{-1}$	$373 \leq T \leq 1073\text{K}, 90\%TD$		
4.1.7	1	1.0	$\text{kJ}/\text{kg}\cdot\text{K}$		300K		1)
比熱							
4.1.8	1	1428	$\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$		Li / Ti = 1.9, 80 %TD		2)
熱容量							
4.1.9	1	192	Mpa	$363 (1 - 2.36 \epsilon)$	$\epsilon = 20\%, 80\%TD$		2)
硬度 (ヴィッカーズ硬度)							

4.2 機械特性 (Mechanical properties of Li_2TiO_3)

項目	データ数	データ	単位	式	条件 (又は備考)	グラフ (Fig.)	参考文献
4.2.1 ヤング率	1	123.3	GPa	$266.8(1-\epsilon)(1-1.2\epsilon)^2$	$\text{Li} / \text{Ti} = 1.9, 80\% \text{TD} (\epsilon = 0.2)$		2)
4.2.2 ポアソン比					(検査中)		
4.2.3 引張強度					(検査中)		
4.2.4 圧縮強度			MPa		(検査中)		
4.2.5 曲げ強度					(検査中)		
4.2.6 クリープレート			1/S		(検査中)		
4.2.7 耐熱衝撃性					(検査中)		
4.2.8 破壊強度	1	92	MPa	$170(1-2.27\epsilon)$	$\text{Li} / \text{Ti} = 1.9, 80\% \text{TD} (\epsilon = 0.2)$		2)

4.3 化学的安定性及び両立性 (Chemical stability and compatibility of Li_2TiO_3)

項目	データ数	データ	単位	式	条件 (又は備考)	グラフ (Fig.)	参考文献
4.3.1 Li_2TiO_3 と水の両立性	1	良好			水と反応しない、水に非常に溶けにくい、40日経過しても溶けない。		2)
4.3.2 Li_2TiO_3 と構造材との両立性	2						
	1				600°Cにおいて、316SS、HT9、316SS+Ni と極微量反応 使用温度範囲 410 ~ 820°C		1)

4.4 トリチウム溶解性及び移行 (Tritium solubility and transport of Li_2TiO_3)

項目	データ数	データ	単位	式	条件 (又は備考)	グラフ (Fig.)	参考文献
4.4.1 Liの質量移行					(検査中)		

項目	データ数	データ	単位	式	条件 (又は備考)	グラフ(Fig.)	参考文献
4.4.2 増殖材内トリチウム 放出時の化学形					(検査中)		
4.4.3	1	5.16	$10^{-7} \text{ m}^2/\text{S}$	$6.455(1-\epsilon)$	Li / Ti = 1.9, 80 %TD ($\epsilon = 0.2$)		2)
トリチウム拡散係数	2	$\sim 10^{-9} (10^6)$	$\frac{\text{cm}^2}{\text{S}}$ ($10^{-7} \text{ m}^2/\text{S}$)		600°C		1)
4.4.4 水蒸気の吸着 及び吸収					(検査中)		
4.4.5 水蒸気の溶解度					(検査中)		
4.4.6 水素溶解度					(検査中)		
4.4.7 水素の吸着					(検査中)		
4.4.8 トリチウム溶解度					(検査中)		
4.4.9 脱離					(検査中)		
4.4.10 残留トリチウム					(検査中)		
4.4.11 トリチウム放出	1	図示			低温(150°C)、低圧(~3MPa)、でトリチウム放出特性がよい。250°Cから300°Cに下がると放出率が急に下がる。	4.4.1	2)
	2	図示					4.4.2
	3	図示					4.4.3

4.5 照射効果 (Radiation effects of Li_2TiO_3)

項目	データ数	データ	単位	式	条件 (又は備考)	グラフ(Fig.)	参考文献
4.5.1 粒成長	1				(検索中)		
4.5.2 スウェリング	1				(検索中)		
4.5.3 健全性	1				(検索中)		
4.5.4 Li移行	1				(検索中)		
4.5.5 熱伝導度	1				(検索中)		
4.5.6 熱膨張	1				(検索中)		
4.5.7 ヤング率	1				(検索中)		
4.5.8 圧縮強さ	1				(検索中)		
4.5.9 曲げ強さ	1				(検索中)		
4.5.10 残留ヘリウム	1				(検索中)		
4.5.11 トリチウム拡散性	1				(検索中)		
4.5.12 トリチウム滞留時間	1				(検索中)		

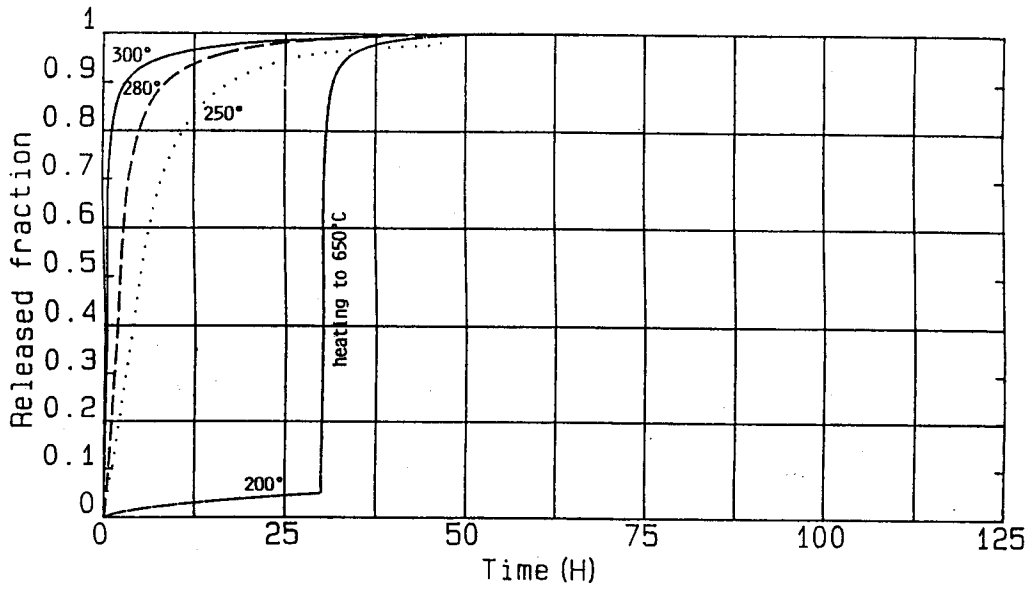


Fig.4.4.1. Isothermal tritium release at 300°C, 280°C, 250°C, 200°C in He + 0.1% H₂ purge gas, flowrate 2.4 lh⁻¹ for Li₂TiO₃^{4,6)}.

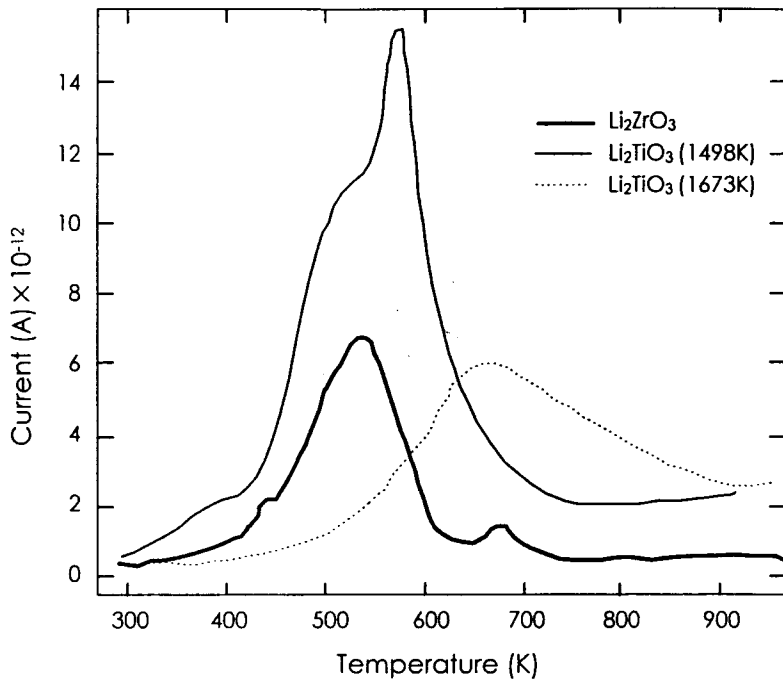


Fig.4.4.2. Tritium desorption curves for Li₂ZrO₃ and Li₂TiO₃ at a linear heating rate of 2 K/min, pure He sweep gas^{4,3)}.

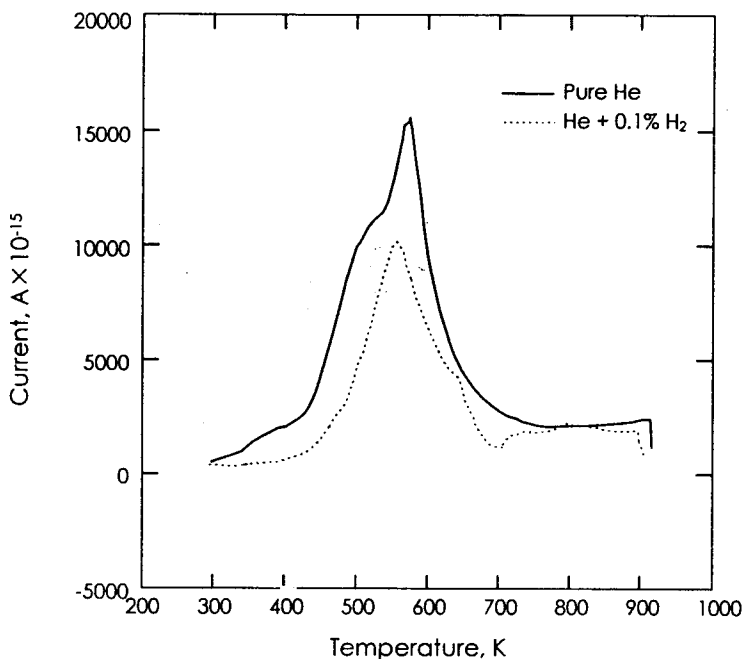


Fig.4.4.3. Effect of purge gas composition on tritium release for sample sintered at 1498 K and heating rate of 2 K/min.

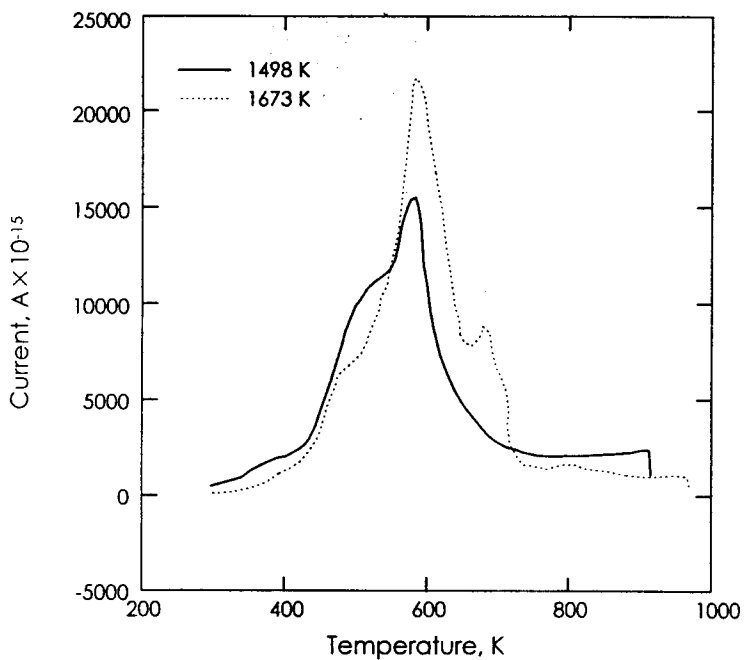


Fig4.4.4. Effect of sintering temperature on tritium release or a purge gas of pure helium and heating rate of 2 K/min⁽⁶⁾.

5. Li₂ZrO₃ (セラミック増殖材) データ

データ表の見方は4章に準ずる。

項目	データ数	データ	単位	式	条件 (又は備考)	グラフ(図)	参考文献
5.1.1 結晶構造	1	単斜晶系(1100℃以下) 正方晶系(1100℃以上)					1)
	2	単斜晶系			1050℃で焼結して作成したもの 0.95(単斜晶系)+0.05(立方晶系)		2)
5.1.2 分子量			g/g-mol	153.25 (1-1.31×10 ⁻² δ) δ=Li中のLi-6の割合	(天然のLi中にLi-6の割合は7.5%) δ = atom fraction Li-6 in Li		7)
	1	4.15 (単斜晶系) 3.65 (正方晶系)	g/cm ³				1)
5.1.3 密度	2	4.15			Li/Zr = 2, 100%TD		2)
	3			δ = 4.1573 (1-1.31×10 ⁻² δ)	δ = atom fraction Li-6 in Li		7)
	1	1615					1)
5.1.4 融点	2	1695	℃		Li/Zr = 2, 100% TD		2)
	3	1695±15					8), 9)
	1	1.8	W/m·K		800K, 85%TD		1)
5.1.5 熱伝導度	2	1.56		2.6(1-2ε)	ε = porosity (10%~30%) Li/Zr = 1.9 80%TD		2)
	3			K = (1-ε) ^{5/3} [3.643(1+1.549×10 ⁻³ T) ⁻¹ + 7.579 × 10 ⁻⁶ T ³]	0.187 ≤ P (porosity) ≤ 0.211 373 ≤ T ≤ 1063K	5.1.1	10)
	4			K = 0.0102 + 6.68T ⁻¹	670K以下, 78.9%TD		11)
	1	10×10 ⁻⁶	1/K				1)
5.1.6 熱膨張率	2	15×10 ⁻⁶	1/K		Li/Zr = 1.9 80%TD (線膨張)		2)
	3		%	ΔL/L = 9.89 × 10 ⁻⁴ (1+1.13×10 ⁻⁵ T) (T-298)	(線膨張)		12)
	4		1/K	α = 9.86 × 10 ⁻⁶ (1+2.27 × 10 ⁻⁵ T)	(Instantaneous coef.)		12)

項目	データ数	データ	単位	式	条件 (又は備考)	グラフ(Fig.)	参考文献
5.1.6	5	9.99×10^{-6}	1/K	$\alpha_m = 9.89 \times 10^{-6} (1 + 1.13 \times 10^{-5} T)$	(Mean coefficient, T=898K)		12)
熱膨張率	6		1/K	$\alpha_m = 9.917 \times 10^{-4} T + 2.705 \times 10^{-1} 373 \leq T \leq 1173K$			13)
5.1.7	1	0.7 (300K)	kJ/kg·K				1)
比熱	2			$C_p = 1.022 - 3.696 \times 10^{-5} \cdot T - 2.791 \times 10^{-4} \cdot T^2$ $350 \leq T \leq 1012K$			14)
5.1.8	1	912	J/kg·K	9.12	Li/Zr = 1.9 80%TD		2)
熱容量	2		J/K·mol	$C_p = 114.7 + 4.772 \times 10^{-2} \cdot T + 7.214 \times 10^{-2} T^2$ $350 \leq T \leq 750K$			11)
5.1.9 硬度(ビッカース硬度)	1	263.4	MPa	$504.6(1 - 2.39 \epsilon)$ $\epsilon = \text{porosity}$	Li/Zr = 1.9 80%TD		2)

5.2 機械特性 (Mechanical properties of Li₂ZrO₃)

項目	データ数	データ	単位	式	条件 (又は備考)	グラフ(Fig.)	参考文献
5.2.1	1	73		$205.2(1 - \epsilon)(1 - 1.28 \epsilon)^2$ $\epsilon = \text{porosity}$	Li/Zr = 1.9 80%TD		2)
ヤング率	2		GPa	$203.35(1 - P)(1 - 1.286P)^2 \times [1 - 2.40 \times 10^{-4} (T - 293)]$ $P = \text{porosity}$ $T = 293$			15)
	3	図示				5.2.1	
5.2.2	1	0.2					17)
ポアソン比	2	0.267		$0.342(1 - 1.09 \epsilon)$ $\epsilon = \text{porosity}$	Li/Zr = 1.9 80%TD		2)
5.2.3 引張強度	1		MPa		(検素中)		
5.2.4	1	236			dg = 0.8 μm, 80%TD dg = 粒径		14)
圧縮強度	2	230 ± 31	MPa		dg = 2 μm, 80%TD dg = 粒径		14)
	3	図示				5.2.2 ⁽⁶⁾	

項目	データ数	データ	単位	式	条件 (又は備考)	グラフ(Fig.)	参考文献
5.2.5 曲げ強度	1	65±15	MPa		25℃, dg = 2μm, 80%TD dg = 粒径		14)
	2	60±20			400℃, dg = 2μm, 80%TD dg = 粒径		14)
	3	63±1			600℃, dg = 2μm, 80%TD dg = 粒径		14)
5.2.6 クリープレート	1	2×10^{-6}	1/S		26MPa, 900℃		18)
	2	8×10^{-6}			75MPa, 900℃		18)
	3	4×10^{-5}			144MPa, 900℃		18)
5.2.7 耐熱衝撃性	1	表 示		$R' = \delta F \cdot \kappa (1 - \nu) / E \cdot \alpha$ 熱歪による亀裂の発生 δF : 引張強度 κ : 熱伝導度 ν : ポアソン比 E : ヤング率 α : 熱膨張係数	δFは増殖材間で差が無いので、κ/E・αの値で耐熱衝撃性を評価出来る。κ/E・αの値をTable5.2.1に示す。Li ₂ SiO ₃ は相当好しい値を示している。		1)
5.2.8 破壊強度	1	65	MPa	$1.21(1 - 2.32 \epsilon) \quad \epsilon = \text{porosity}$	Li / Zr = 1.9 80%TD		2)

Table 5.2.1 Material Properties related to the Generation of Thermal Crack in Ceramic Breeding Materials

Material	K(600°C) (w/m K)	α (600°C) (10^{-3} K)	E(R.T) (GPa)	K(E α) (10^{-6} m ² /s)
Li ₂ O	3.5	3.3	70	1.5
LiAlO ₂	2.6	1.2	80	2.7
Li ₂ SiO ₃	2.0	2.1	55	1.7
Li ₄ SiO ₄	1.9	3.6	50	1.1
Li ₂ ZrO ₃	1.4	1.1	70	1.8

5.3 化学的安定性及び両立性 (Chemical stability and compatibility of Li_2ZrO_3)

項目	データ数	データ	単位	式	条件 (又は備考)	グラフ(Ref.)	参考文献
5.3.1 水との両立性	1			Li_2ZrO_3 中のLiは、水浸1ヶ月後完全に溶解する。 ZrO_2 が残る。	Li_2TiO_3 のLiは水浸40日後も溶けていない		2)
	2			2)の[9]のreferenceを調査のこと			
	3	表示 (Table5.3.1)			600℃の Li_2ZrO_3 を98℃の高温水に投入した場合の相互作用		
	4	表示 (Table5.3.2)			98℃の高温水を600℃の Li_2ZrO_3 に投入した場合の相互作用		
	5	加水分解(25℃, 100℃)				水	
5.3.2 構造材との両立性	1	相互作用なし(steeels)			真空~700℃の間は、no significant interaction		2) 22) 47)
	2	相互作用なし (Be)			真空~600℃の間は、no significant interaction 湿ったHelium中でBeの少量の酸化が見られる		21)23)48)
	3	両立性なし			800℃になるとスチール及びBeとの両立性はなくなる。		
	4				600℃で 316SS, 1119, 316SS + Ni との反応性小	使用温度範囲 400℃~1400℃	
5.3.3 水蒸気との相互作用	1	No Data			水蒸気の溶解度及び吸着に関するデータなし		

Table 5.3.1 Interaction between Water and 600°C Ceramics thrown in 98°C Water^{1) 2)}

Breeder Material	Chemical Heat Release	H ₂ generation mol H ₂ /g Material	Time to reach peak temp.(s)
Li ₂ O	Mild	2.7×10^{-3}	90
Li ₂ TiO ₃	None	None	—
Li ₂ SiO ₃	None	None	—

Table 5.3.2 Interaction between 600°C Ceramics and 98°C Water injected to 600°C Ceramics^{2) 1)}

Breeder Material	Mass Water(g) Mass Breeder M(g)	Peak Temp.(°C)	Gas Released Mole/Mole water	H ₂ Released Mole/Mole water	Time to Reach Peak Temp.(S)
Li ₂ O	3.0 / 50	625	0.275	0	50
Li ₂ ZrO ₃	3.1 / 50	600	1.0	0	—
LiAlO ₂	3.3 / 50	600	1.0	0	—
Li ₄ SiO ₄	3.0 / 50	600	1.0	0	—
Li	3.0 / 20	900	0.37	0.16	10

5.4 トリチウム溶解性及び移行 (Tritium solubility and transport of Li_2ZrO_4)

項目	データ数	データ	単位	式	条件 (又は備考)	グラフ(Fig.)	参考文献
5.4.1 Liの質量移行	1	移行なし					39)
5.4.2 増殖材内トリチウム 放出時の化学形	1	表 示 (Table 5.4.1 ²⁵⁾⁻³²)					
5.4.3	1	表 示 Table 5.4.2 27) 30) 33) - 35)	cm ² /S	Li ₂ ZrO ₃ の他 Li ₂ O, Li ₂ TiO ₃ 等の値を比較の為に示す	600℃	5.4.1	
	2	図 示				5.4.2	
トリチウム拡散係数	3	図 示	10 ⁻⁷ $\frac{\text{m}^2}{\text{S}}$	6.175(1-ε) ε = porosity	Li / Zr = 1.9, 80%TD		
	4	~ 10 ⁻⁹					
5.4.4 水蒸気の吸着 及び吸収		No Data			(注)吸着吸収を溶解と同意に解する (検 索 中)		4)
5.4.5 水蒸気溶解度		No Data			(検 索 中)		4)

核融合炉ブランケットデータベース(2)

項目	データ数	データ	単位	式	条件 (又は備考)	グラフ(Fig.)	参考文献
5.4.6 水素溶解度	1	No Data			(検索中)		
5.4.7 水素の吸着		No Data			(検索中)		4)
5.4.8 トリチウム溶解度					(検索中)		
5.4.9 脱離					(検索中)		
5.4.10 残留トリチウム	1	図示				5.4.3	
5.4.11 トリチウム放出	1	図示			250℃と200℃の間でトリチウム放出は相当小さくなる。200℃に下がるまで約120時間内に40%が放出される。	4.4.2	2)
	2	図示			2K/mのlinear heating 時のトリチウム放出状況、Li ₂ TiO ₃ との比較で示す。	5.4.6	43)

Table 5.4.1 Chemical composition of Tritium Released by Heating in Vacuum^{25)~32)}

Material	Neutron fluence cm ⁻²	Upper Temp. K	% of total tritium			
			HTO	HT	CH ₃ T ³	Retention
Li ₂ O unirradiated		975	95.4	3.8	0.3	0.5
Li ₂ O	5.4 × 10 ¹⁵	873	99.1	0.4	0.3	0.2
	3.6 × 10 ¹⁶	873	98.0	0.9	1.0	0.1
	3.1 × 10 ¹⁶	873	97.6	1.8	0.5	0.1
Li ₂ O pellet (76.5%TD)	8.9 × 10 ¹⁷	873	93.4	5.6	0.8	0.1
	5.4 × 10 ¹⁵	1073	95.4	3.5	0.5	0.6
Li ₂ SiO ₃	2.5 × 10 ¹⁶	1073	97.1	2.5	0.4	0.01
Li ₂ ZrO ₃	2.5 × 10 ¹⁶	1173	99.0	0.7	0.3	—

Table 5.4.2 Diffusion Coefficient of Tritium in Oxide Ceramic Breeder Materials^{27) 30) 33) 34) 35)}

Material	Neutron fluence	log Do	Q	Temp. range
	cm ⁻²	cm ² s ⁻¹	kJ mol ⁻¹	K
Li ₂ O	8.1 × 10 ¹⁶	-4.1 ± 0.5	77.4 ± 5.6	570-690
Y-LiAlO ₂	2.5 × 10 ¹⁶	-4.7 ± 0.5	90.3 ± 1.0	630-920
Li ₂ SiO ₃	2.5 × 10 ¹⁶	-4.7 ± 0.8	81.1 ± 11.7	650-840
Li ₄ SiO ₄	2.5 × 10 ¹⁶	-6.7 ± 0.1	43.8 ± 0.9	530-850
Li ₂ ZrO ₃	2.5 × 10 ¹⁶	-4.9 ± 0.2	75.0 ± 2.2	540-730
Li ₆ ZrO ₆	2.5 × 10 ¹⁶	-5.5 ± 0.3	57.8 ± 3.0	500-670

5.5 照射効果 (Radiation effects of Li_2ZrO_3)

項目	データ数	データ	単位	式	条件 (又は備考)	グラフ (Fig.)	参考文献
5.5.1 粒成長	1	成長なし					37)
5.5.2 スウェリング	1	0.7%以下				5.5.1	38)
						5.5.2	
5.5.3	1	良好 (very good)					38)
健全性	2	良好			1225°Cで2年間、非常に大きな熱応力にも関わらず、マイナクラックだけである。ペレットの温度差100°C以下、クラックはほとんどない。		44)
	3				500°C, 700°C, 900°Cで3%リチウム Burn-upのテストで健全性保持。		45)
	1	なし					39)
5.5.4 Li移行	1	変化なし					14)
5.5.5 熱伝導度	1	変化なし					14)
5.5.6 熱膨張	1	変化なし					14)
5.5.7 ヤング率	1	約30%増					14)
5.5.8 圧縮強さ	1	目立って減少			曲げ強さの挙動と一致しない		14)
5.5.9 曲げ強さ	1				scattered value available		14)
5.5.10 残留ヘリウム	1	(非常に少ない) 図示				5.5.3	40)
	2	図示				5.5.4	

項目	データ数	データ	単位	式	条件 (又は備考)	グラフ(Fig.)	参考文献
5.5.11 トリチウム拡散性	1	No Data			単結晶について		
5.5.12 トリチウム滞留時間	1	式示及び図示	h	$T = 1.089 \times 10^{-18} \exp(230.5 \text{ kJ} \cdot \text{mol}^{-1} / RT)$ $T \geq 583 \text{ K}, 0.5 \leq dg \leq 1 \mu\text{m}, 20 \leq P \leq 25\%$ $\text{H}_2 + 0.1\% \text{H}_2 \text{ パージ}$ dg: 粒径, P: porosity		5.5.5	41)
	2	24	h		300°C, He + 0.1% H ₂ パージガス	LILA/LISA	2)
	3	24	h		285°C, He + 0.1% H ₂ パージガス トリチウムイソペンチリ: 0.1 (wppm) 390°C	EXOTIC5	2)
	4	24	h		265°C, He + 0.1% H ₂ パージガス トリチウムイソペンチリ: 0.009 (wppm) 450°C	EXOTIC6	2)
	5	3~10	h		320°C, He + 0.1% H ₂ パージガス トリチウムイソペンチリ: 0.3 (wppm) 320°C 0.03 (wppm) 500°C	CORELLI2	2)

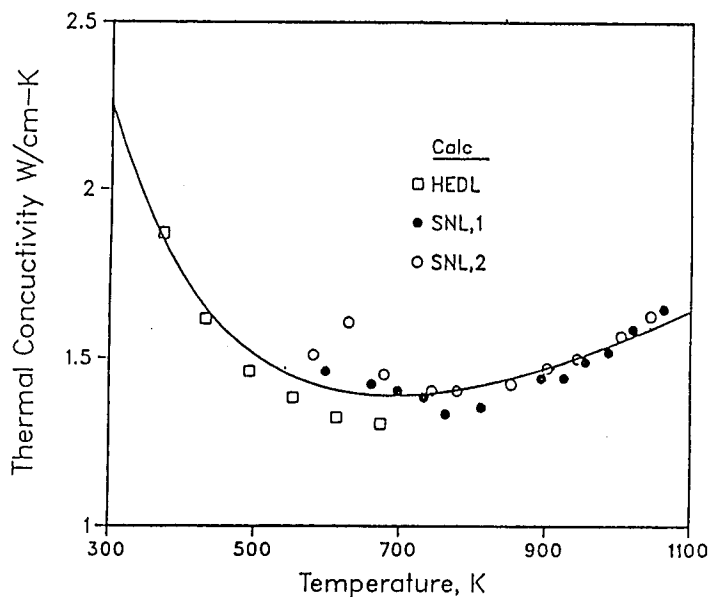


Fig.5.1.1 Thermal Conductivity Data for Porous (~20%) Li_2ZrO_3 .

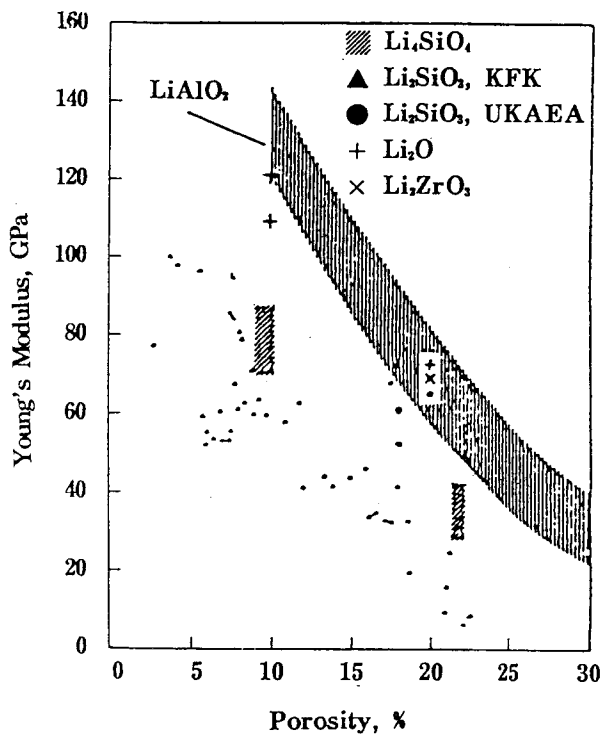


Fig.5.2.1 Young's Modulus of Breeder Ceramics¹⁶⁾.

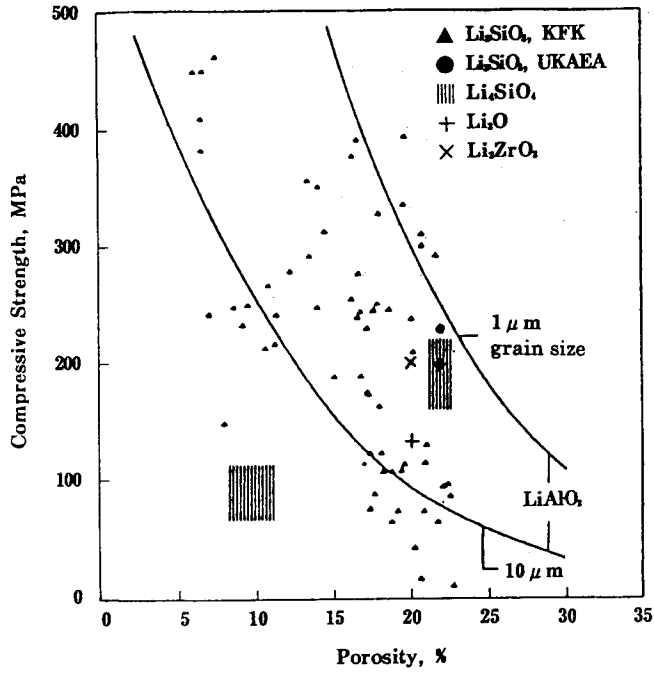


Fig.5.2.2 Compressive Strength of Breeder Ceramics^{1,6)}.

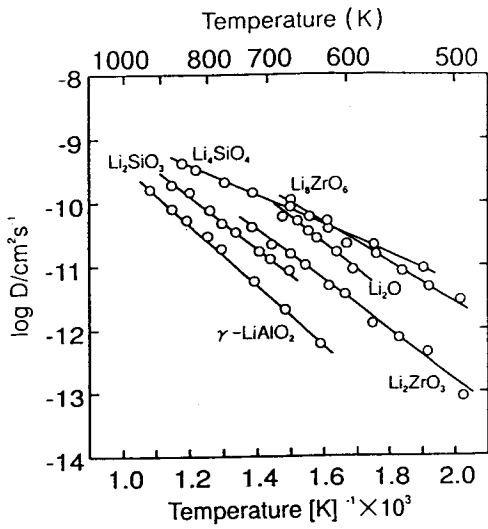


Fig.5.4.1 Diffusion Coefficient of in Oxide Ceramic Breeding Materials.

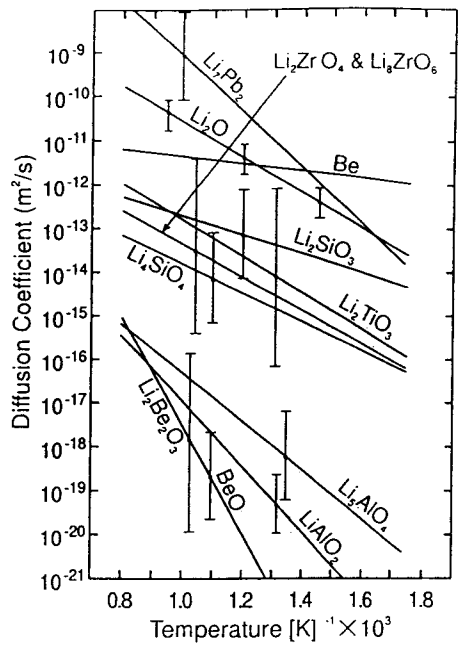


Fig.5.4.2 Summary of Tritium Diffusion Coef. In Breeding Materials³⁾

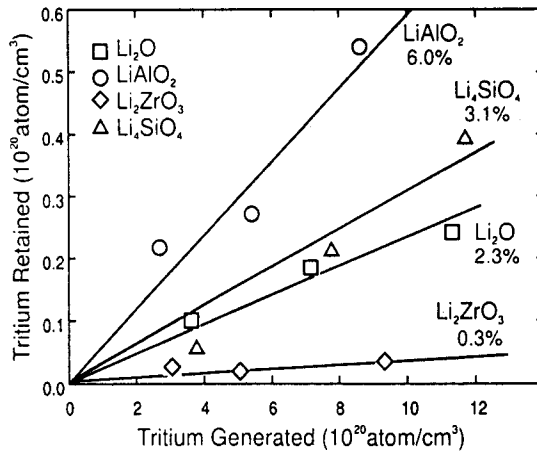


Fig.5.4.3 Tritium Retention in Li_2ZrO_3 , Li_2O , Li_4SiO_4 , and LiAlO_2 at 700°C ⁽⁴⁰⁾.

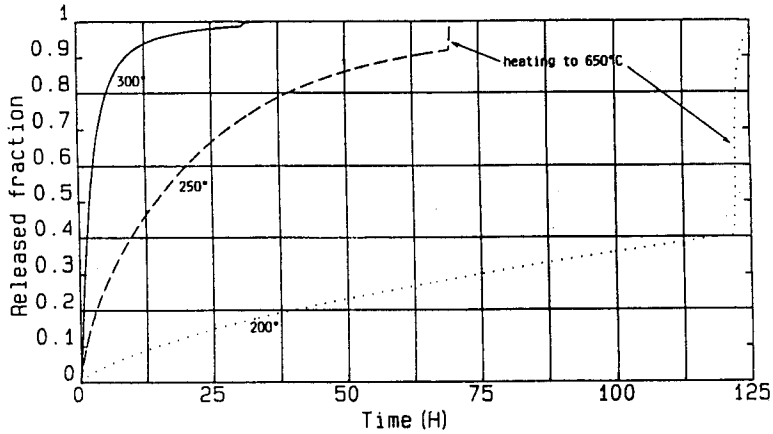


Fig.5.4.4 Isothermal tritium release at 300°C , 250°C , 200°C in $\text{He}+0.1\%$ H_2 purge gas, flowrate 2.4lh^{-1} for Li_2ZrO_3 .

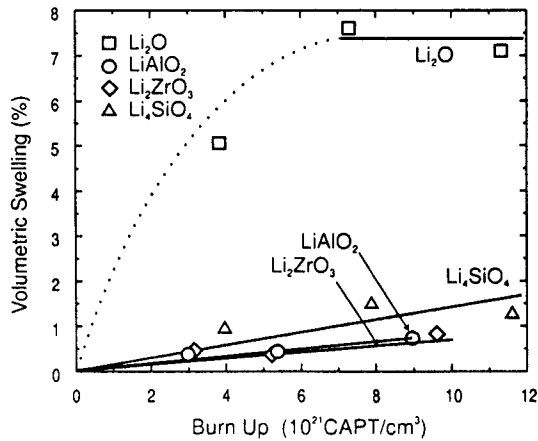


Fig.5.5.1 Volumetric Swelling of Li_2ZrO_3 , Li_2O , Li_4SiO_4 and LiAlO_2 at 700°C ⁽⁴⁷⁾

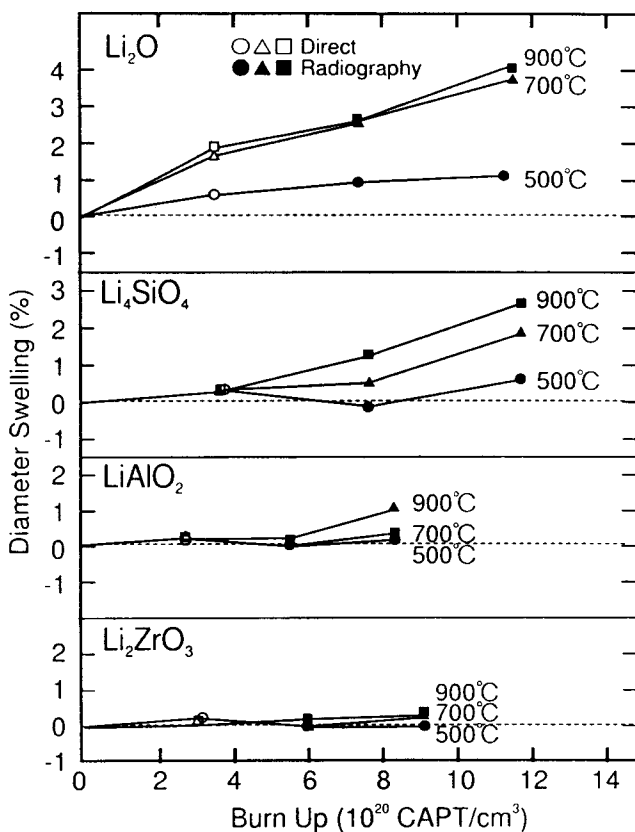


Fig.5.5.2 Diameter Swelling of Li₂O, LiAlO₂, Li₄SiO₄ and Li₂ZrO₃ at 500°C, 700°C, 900°C^(4,2)

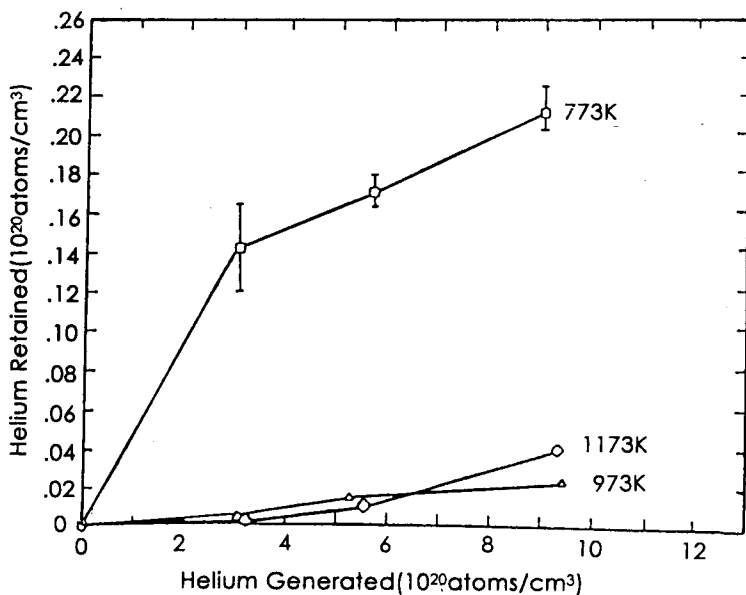


Fig.5.5.3 Helium Retention in Li₂ZrO₃.

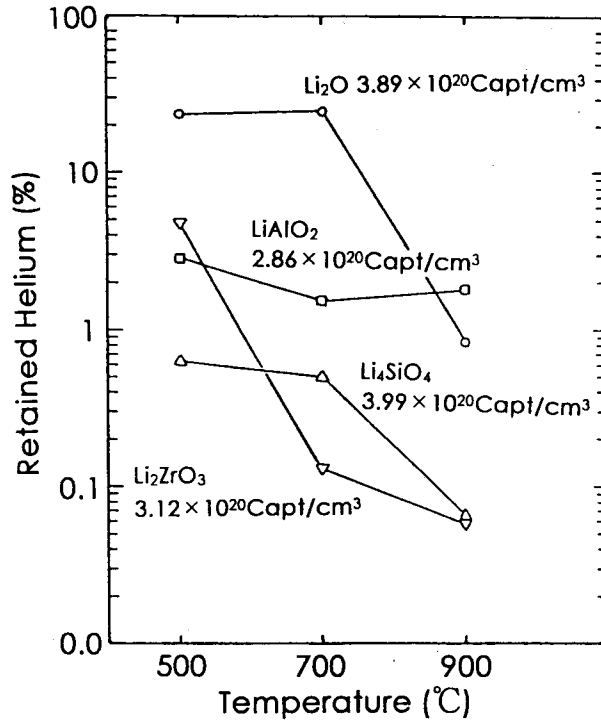


Fig.5.5.4 Helium, Retention in Li₂O, LiAlO₂, LiSiO₄ and Li₂ZrO₃ after irradiation.

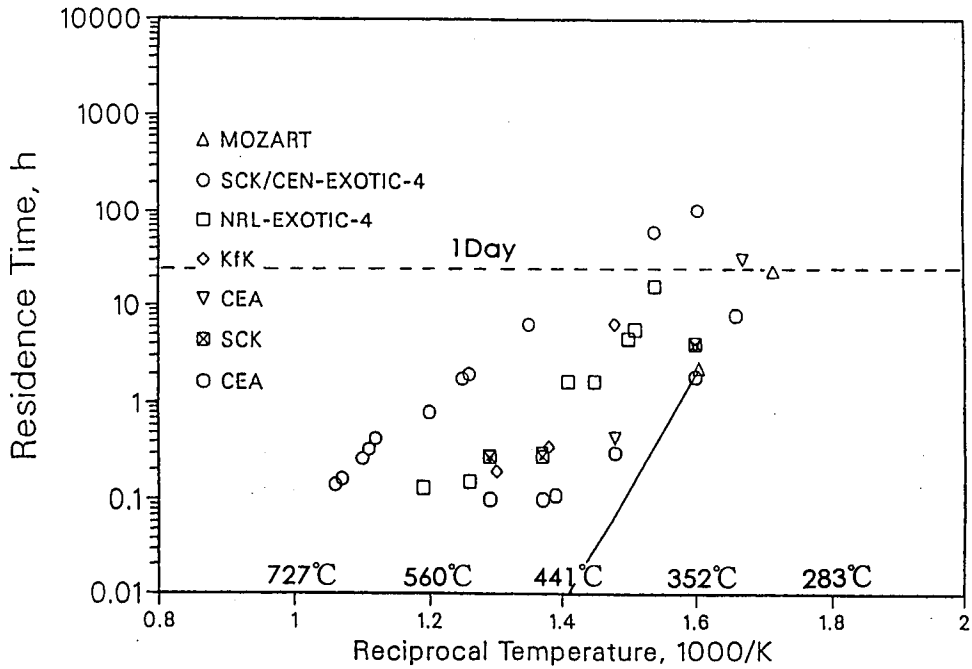


Fig.5.5.5 Residence Times for Li₂ZrO₃.

6. データの検討評価

データベース (2) では、収集したデータの検討評価は実施しないで、現存するデータを収集することに専念した。今後、中性子増倍材 (Be)、構造材および冷却材等に係るデータを収集する計画である。データを収集していけば、データが多く得られている項目、データが殆どない項目が判り、且つ、その理由も判ってくる。この時点で、データの検討評価を実施するのが妥当と考えている。

7. あとがき

ブランケットデータベースの作成の第二回として、 Li_2O に次いで有力な固体増殖材の候補材となっている、 Li_2TiO_3 、 Li_2ZrO_3 セラミック増殖材に関して所定項目のデータを収集し、大別された特性にしたがって分類整理した。すなわち、第一回と同じく材料別にデータを収集し、それらを特性別に分類整理し、データをマトリックス形式でまとめた。

筆者等が本方法を採用したのはやはり妥当であったことが、今回 Li_2TiO_3 および Li_2ZrO_3 セラミック増殖材について実施して明白になってきた。 Li_2ZrO_3 に関するデータは Li_2O に比べて少なく、 Li_2TiO_3 に関するデータは Li_2ZrO_3 に比べて非常に少ない。 Li_2O に比べれば遥かに少ない。すなわち、第4章 Li_2TiO_3 のデータ表を見ると、相当の欄が(検索中)になっていることが、このこと証明している。しかし、これらの欄は関係者の努力によって何れ近いうちに満たされることが期待される。

ここに収集したデータには不十分な点もあると考えられるから、より安全なものにするために、関係者の協力を得てデータの収集を続行していくことにしている。

こうしてできたデータベースによって、ブランケットに係るデータ収集の実状およびその内容を系統的に把握することができる。したがって、このデータベースはブランケットの設計、特性解析および安全解析等に対して最適のデータを提供するとともに、データベースをより完成されたものにするには、何をすべきかを示唆するものであると考えられる。

謝 辞

本データベースシリーズ作成の動機付けおよび本データベース (2) の作成に際して絶えずご助言いただいた、富山大学の渡辺教授に深甚な謝意を呈します。

文献リスト

- 1) 核融合炉トリチウム増殖材料の増殖・回収性能評価1989.3 昭和63年度(1988) 文部省科学研究費補助金 研究成果報告書
- 2) N.Roux, J.Avon, A.Florence, J.Mougin, B.Rasneur, S.Ravel, "Low-Temperature Tritium Releasing Ceramics as Potential Materials for the ITER Breeding Blanket",

- Proc Int. Workshop on Ceramic Breeder-Blanket Interactions, Oct.9~11, 1955, Kyoto, Japan.
- 3) S.Hull, et, "The Elastic Properties of Lithium Oxide and Their Variation with Temperature", J.Nucl. Mater, 160 (1988), 125
 - 4) ITER Solid Breeder Blanket Materials Date Base by M.C.Billone, W.Dienst, T.Flaument, P.Lorenzette, K.Noda, N.Roux, May 1983, ANL/FPP/TM-263
 - 5) R.T.Girard et al., U.S.Patent# 3,397,080 (1968)
 - 6) UCLA-ENG-86-44 (1987) S.Hull, et, "The Elastic Properties of Lithium Oxide and Their Variation with Temperature", J.Nucl.Mater, 160 (1988), 125
 - 7) D.J.Suiter, "Lithium Based Ceramics for Tritium Breeding Applications," McDonnell Douglas Astronautics Company Report MDC E2677 (UC-20), June 1983.
 - 8) "Semi-Annual Report of KfK/Euratom April-September 1989," KfK Report 4677, November 1989.
 - 9) G.P.Wyers and E.H.P.Gordfunke, "Phase Relations in the System Li_2OZrO_2 ," J. Nucl. Mater. 168 (1989) 24.
 - 10) W.Dienst and H.Zimmerman, "Investigation of the Mechanical Properties of Ceramic Breeder Materials," J.Nucl. Mater. 155-157 (1988) 476.
 - 11) G.W.Hollenberg, D.E.Baker, HEDL-SA-2674-FP (1982)
 - 12) G.W.Hollenberg, "Thermal Properties of Lithium Ceramics for Fusion Applications," 84th Annual Meeting of the American Ceramic Society, Cincinnati, Ohio, May 3-5, 1982.
 - 13) G.W.Hollenberg, presented at 84th Annual Meeting of America Ceramics Society (May 3-5, 1982)
 - 14) D.A.Moore, "A Compiation of Date and a Review of the Properties of Lithium Monoxide and Lithium Zirconates Relevant to Their Use as Tritium Breeder Material in Fusion Reactors," NRL-R-2014 (S) to be published.
 - 15) B.Rasneur, "Fabrication, Machanical and Chemical Properties of LiAlO_2 and Li_2ZrO_3 as Tritium Breeders for a Solid Blanket," Presented at the 91st Annual Meeting of the American Ceramic Society, Indianapolis, April 1989.
 - 16) W.Dienst, H.Zimmerman, J.Nucl. Mater. 155-157 (1988) 476.
 - 17) P.Kennedy, "The Preparation, Characterization and Properties of Lithium Oxide and Matazirconate Speciments Irradiated in HFR Petten in the Second and Third EXOTIC Experiments" 14th SOFT, Fusion Technology. (1986) 1013.
 - 18) W.Dienst, "Contribution of the Date Base for the International Fusion Materials Handbook: Mechanical Properties and Compatibility of Ceramic Breeding Materi-

- als, : IMF-Notiz 129 (1989)
- 19) D.W.Jappson and R.F.Keough, Nucl Tech/Fusion, 4 (1983) 277.
 - 20) P.Hoffman and W.Dienst., Compatibility studies of Materials with Lithium-Based Oxides, J.Nucl. Mater. 155-157 (1988) 485.
 - 21) D.W.Jeppson and R.F.Keogh : J.Nucl Mater. 103-104 (1981) 56.
 - 22) P.Hormann and W.Dienst, "Chemical Compatibility Between Lithium-Based Oxide Ceramics and Stainless Steels, "J.Nucl. Mater. 141-143 (1986) 289.
 - 23) A.Terlain, D.Herpin, P.Perodeaud, T.Flament, and J.Sannier, "Compatibility Problems with Beryllium in Ceramic Blankets," 15th SOFT, Fusion Technology (1988) 1179.
 - 24) B.Raneur, "Determination of Chemical Characteristics of LiAlO_2 and Li_2ZrO_3 for a Fusion Reactor Blanket, "15TH soft, Fusion Techn. (1988).
 - 25) H.Kudo, K.Tanaka, H.Amano, J.Inorg. Nucl. Chem, 40 (1978) 363.
 - 26) H.Kudo, J.Radioanal. Chem. 67 (1981) 37.
 - 27) H.Kudo, K.Okuno, J.Nucl. Mater, 101 (1981) 38.
 - 28) H.Kudo, K.Kushita, K.Okuno, J.Nucl. Mater. 116 (1983) 73.
 - 29) H.Kudo, K.Okuno, Radio Chem. Acta., 33 (1983) 223.
 - 30) H.Kudo, K.Okuno. J.Nucl. Mater., 133-134 (1985) 192.
 - 31) K.Okuno, Y.Nagame, H.Kudo, J.Less-Comon Met, 119 (1986) 211.
 - 32) H.Kudo, J.Nucl. Mater., 87 (1979) 185.
 - 33) K.Okuno, H.Kudo, J.Nucl. Mater., 116 (1983) 82.
 - 34) K.Okuno, H.Kudo, J.Nucl. Mater., 138 (1986) 210.
 - 35) H.Kudo, K.Okuno, J.Nucl. Mater., 155-157 (1988) 524.
 - 36) M.Glugia, K.H.Simon and R.D.Penzhorm, J.Nucl. Mater. 155-157 (1988), 513.
 - 37) G.W.Hollenberg, "Fast Neutron Irradiation Results on Li_2 , Li_4SiO_4 , Li_2ZrO_3 , and LiAlO_2 ," J.Nucl. Mater. 123 (1984) 896.
 - 38) G.W.Hollenberg, "Pellet Integrity and Swelling of Lithium Ceramics," in Fusion Reactor Materials Semi-annual Progress Report for Period Ending September 30, 1986, DOE/ER-0313/1 (June 1989) 373-380.
 - 39) Y.Ikeda, H.Ito, G.Matsumoto, and H.Hayashi, "The Vaporization and Thermochemical Stability of Lithium Aluminates," J.Nucl. Mater. 97 (1981) 47-58.
 - 40) D.L.Baldwin and G.W.Hollenberg, "Measurement of Tritium and Helium in Fast Neutron Irradiated Ceramics Using High Temperature Vacuum Extraction," J.Nucl. Mater. 141-143 (1986) 305.
 - 41) M.Briec. J.J.Abassin, C.E.Johnson, M.Masson, N.Roux, and H.Watanebe, "The

- MOZART Experiment: In-Pile Tritium Extraction from Lithium Oxide, Aluminate, Zirconates, "Proc. 15th SOFT, Fusion Techn. (1988) 1105.
- 42) G.W.Hollenberg, D.L.Baldwin, J.Nucl. Mater. 123 (1984) 896.
- 43) J.M.Miller, H.B.Hamilton, J.D.Sullivan: J.Nucl. Mater. 212-215 (1994) 877-880
- 44) N.Roux, G.Hollenberg, C.Johnson, K.Noda, R.Verral: Fusion Engineering and Design 27 (1995) 154-166
- 45) G.W.Hollenberg, D.L.Baldwin: J.Nucl. Mater. 133-134 (1985)
- 46) J.P.Kopasz, J.M.Miller, C.E.Johnson: J.Nucl. Mater 212-215 (1994) 927-931
- 47) C.E.Johnson, K.R.Kummerer and E. Roth, J.Nucl. Mater 115-157 (1988) 188.